БЕЗОПАСНОСТЬ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ЧЕЛОВЕКА
SAFETY OF HUMAN ACTIVITY



УДК 331.453:621.791 DOI 10.12737/20569

Методология и принципы поиска решений, обеспечения безопасности работы сварщиков в стеснённых условиях и на труднодоступных объектах*

Д. А. Корончик [1], Ю. И. Булыгин [2], Д. В. Рогозин [3], А. Л. Гайденко [4], А. Н. Легконогих [5]**

[1,2,3,4,5] Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Methodology and principles of searching solutions to ensure safe operation of welders in confined spaces and hard-to-reach places ***

D. A. Koronchik [1], Y. I. Bulygin [2], D. V. Rogozin [3], A. L. Gaydenko [4], A. N. Legkonogikh [5]**

[1,2,3,4,5] Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Целью исследования является поиск решений по обеспечению безопасности работы сварщиков на труднодоступных объектах в условиях ограниченного замкнутого пространства с быстрым нарастанием содержания вредных веществ и температуры окружающей среды. Предметом исследования являются системы защиты органов дыхания сварщика, работающего в стеснённых условиях с сильной загазованностью и отсутствием или недостаточностью естественной циркуляции окружающего воздуха. Метод исследования — численное моделирование тепломассопереноса вредных веществ, сварочной аэрозоли и избытков теплоты при нестационарном режиме в трехмерной постановке. Методологией работы является построение математических моделей тепломассопереноса загрязнений на основе классических газодинамических моделей с адаптацией их к конкретным граничным условиям, особенностям различных видов сварки на труднодоступных объектах, в том числе глубоководной сварки и с учетом различных видов теплообмена. Построена классификация труднодоступных объектов и способов сварки. Показано, что полученные математические модели позволяют детально определить физические поля воздействия на сварщиков опасных и вредных производственных факторов.

The study aims at finding solutions to ensure the safe operation of welders for hard-to-reach objects in the limited enclosed space with a rapid rise in the content of harmful substances and ambient air temperature. The research subject is the systems of lung protection for welders working under the constrained conditions with high gaseousness and lack or insufficient natural circulation of the ambient air. The research method is a numerical simulation of heat and mass transfer of the harmful substances, welding aerosols, and excess heat under the transient conditions in the three-dimensional formulation. The work methodology is the construction of mathematical models of heat and mass transfer of the contaminants on the basis of the classical gas flue models with their adaptation to the specific boundary conditions, the characteristics of different types of welding in hard-to-reach places including deepwater welding, and taking into account various types of heat transfer. A classification of hard-to-reach objects and types of welding is worked out. It is shown that the resulting mathematical models allow specifying in detail the physical fields of dangerous and harmful factors impact on the welders.

Ключевые слова: тепломассоперенос, моделирование, вредные вещества, безопасность, сварка под водой.

Keywords: heat and mass transfer, modeling, harmful substances, safety, deepwater welding.

Введение. Проектирование и создание систем и средств защиты оператора-сварщика лежит в области детального математического описания нестационарных процессов тепломассопереноса вредных веществ и избытков теплоты от источников загрязнения. На основе полученных результатов создаётся технология проектирования систем и средств защиты операторов [1].

Основной задачей проекта является поиск решений по обеспечению безопасности работы сварщиков при выполнении сварочных работ на труднодоступных объектах при строительстве и ремонте нефтегазодобывающих платформ на шельфе. Заявленная конечная цель проекта достаточно сложная, поэтому необходимо на первом этапе работ выполнить следующее:

1. Уточнить план научно-исследовательских работ и привести его в соответствие с основной задачей

---

* Работа выполнена по гранту РФФИ №16-38-60055.

** E-mail: koronchic@mail.ru, dmrogozin@ya.ru, bulyur_rostov@mail.ru, toliamba1@mail.ru, lan-666-121285@mail.ru

*** The research is done on RFFI grant no. 16-38-60055.

проекта, показав новизну каждого этапа работ.

2. В проекте необходимо показать, для каких видов сварки проводятся исследования, так как рассматриваемые в работе объекты исследования (наземные и подводные, полуоткрытые и закрытые) специфичны и сильно отличаются, в том числе и по условиям сварки.

Классификация по объектам исследования. На рис.1 показаны рассматриваемые в проекте объекты исследования, для которых будут выстроены соответствующие нестационарные трехмерные математические модели тепломассопереноса вредных веществ, сварочной аэрозоли и избытков теплоты. Нетрудно заметить, что классификация по объектам исследования соответствует годовым этапам проводимых по проекту работ. На каждом этапе под соответствующий объект авторами разрабатывается математическая и затем расчетная модель массо- теплопереноса загрязнений со своими граничными условиями.

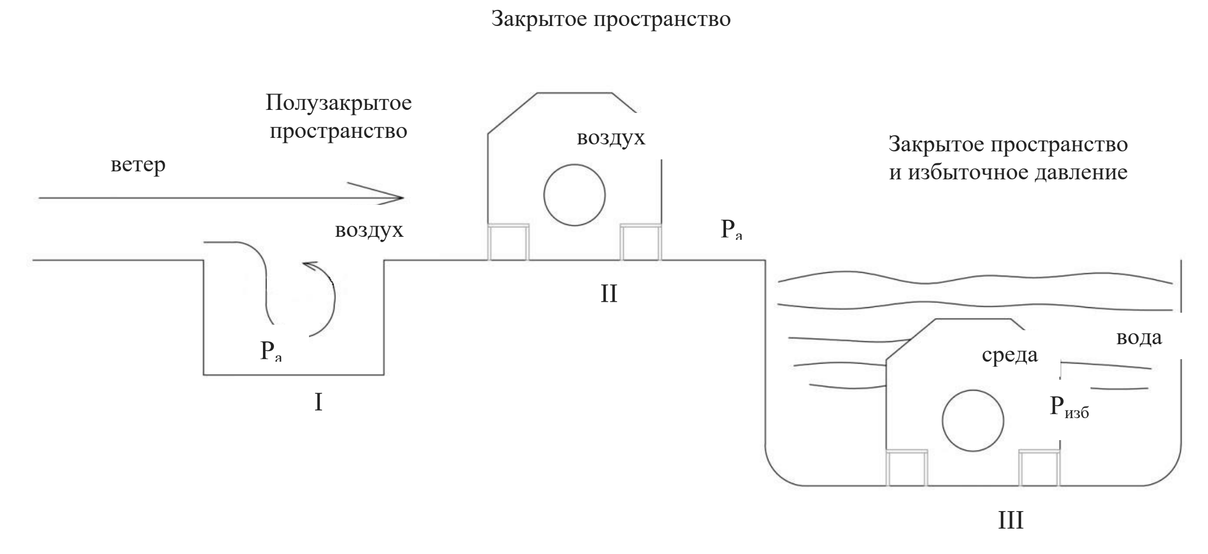


Рис. 1. I, II, III – Объекты исследования проекта

Классификация по способам сварки исследования. К объектам исследования типа I (рис.1) можно отнести выполнение сварочных работ в полуоткрытых пространствах с затрудненными условиями естественной циркуляции окружающего воздуха (ямы, траншеи, колодцы) при ремонте и реконструкции участков существующих газопроводов в городском коммунальном хозяйстве. Наиболее распространённым способом сварки, а в некоторых случая и единственно возможным по техническому обеспечению, является газовая сварка элементов газопроводов из углеродистых и низколегированных сталей [1].

К объектам исследования типа II относятся сварочные работы при строительстве магистральных трубопроводов. Сварка кольцевых стыков труб осуществляется внутри специальных устройств (будок, палаток) с целью недопущения воздействия окружающей среды (порывы ветра, осадки, притоки холодного воздуха) в зоне сварки. Наибольшее распространение находит высокопроизводительная механизированная сварка самозащитной порошковой проволокой Innershield [2,3]. Несмотря на высокую производительность и качество сварных швов, сварка самозащитной порошковой проволокой является наиболее неблагоприятным с точки зрения выделения вредных веществ в зоне сварки, прежде всего за счет выделения фторидов [4]. Эти обстоятельства и определили выбор данного способа сварки в качестве объекта исследования.

Выполнение сварочных работ при строительстве и ремонте нефтегазовых объектов, расположенных в водных территориях шельфов морей и океанов на глубинах более 20 метров, осуществляется внутри кессона, устанавливаемого на свариваемые элементы, ограждая их от воздействия воды. Сварка внутри кессона осуществляется в газовой смеси (как правило, в гелево-кислородной) в резко ограниченном пространстве и действии гидростатического давления [5]. Среди способов сварки преобладают механизированная сварка плавящейся проволокой сплошного сечения в среде активных и инертных газов и самозащитной порошковой проволокой (МИГ/МАГ сварка). Повышенное давление оказывает существенное влияние на условия работы водолаза-сварщика, процесс сварки и состав наплавленного металла [6, 7, 8].

Обобщение способов сварки, применяющихся на объектах исследования, приведены в таблице 1.

Таблица 1

Способы сварки по объектам исследования

Объект исследования	I	II	III
Способ сварки	Газовая (ацетилено-кислородная) сварка	Механизированная сварка самозащитной порошковой проволокой INNERSHIELD	Механизированная сварка проволокой сплошного сечения в защитных газах; механизированная сварка самозащитной порошковой проволокой

Требования к математическим моделям тепломассопереноса загрязнений и их особенности по объектам и видам сварки. Основной фундаментальной частью исследования является адаптация классической модели непрерывной среды на базе системы уравнений Навье-Стокса к решению комплексной задачи теплообмена со сложными движущимися граничными условиями.

Предлагаемый подход не является оригинальным, однако имеются отдельные синтезированные на предварительном этапе исследований принципы адаптации существующих подходов.

Ввиду сложности поставленной задачи и сделанном акценте на численное моделирование при решении комплексной задачи тепло- и массообмена, следует заключить, что методика исследования выбрана верно.

В работе [9] показано, что в этих условиях можно использовать стандартную $k-\varepsilon$ модель турбулентности, которая реализуется во всех стандартных пакетах CAE. В данной работе был использован пакет SolidWorks Flow Simulations, поскольку позволяет построить расчетные поля концентраций вредных веществ, температур в рабочей зоне сварщика и подвижности воздуха.

Учёт теплопередачи в твердых телах и радиационный теплообмен.

Моделирование процессов диффузии тепла в текучей среде основано на решении уравнений (1) и (2):

$$\frac{d\left(\rho H\right)}{dt}+\frac{d\left(\rho u_i H\right)}{dx_i}=\frac{d}{dx_i}\left(u_j\left(\tau_{ij}+\tau_{ij}^R\right)+q_i\right)+\frac{dp}{dt}-\tau_{ij}^R\frac{du_i}{dx_j}+\rho\varepsilon+S_i u_i+Q_H; \quad (1)$$

$$q_i=\left(\frac{\mu}{\Pr}+\frac{\mu_t}{\sigma_C}\right)\cdot\frac{dh}{dx_i}, \quad i=1,2,3. \quad (2)$$

где u — скорость потока, ρ — плотность, p — давление, H — удельная энергия, $G_i=-\rho\cdot g_i$ — гравитационная компонента; h — энтальпия, ε — скорость диссипации кинетической энергии турбулентности; S_i — источник выделения вещества; Q_H — объёмная интенсивность источника теплоты, τ_{ij} — тензор вязких напряжений, τ_{ij}^R — тензор напряжений Рейнольдса; q_i — изменение теплоты; μ — коэффициент динамической вязкости, μ_t — коэффициент турбулентной динамической вязкости, константа σ_c = 0,9, Pr — число Прандтля, x_i — пространственная координата

Теплопередача в твердых телах моделируется на основе решения уравнения (3):

$$\frac{d\left(\rho e\right)}{dt}=\frac{d}{dx_i}\left(\lambda\frac{dT}{dx_i}\right)+Q_H, \quad (3)$$

где $e=c\cdot T$, c — удельная теплоемкость, T — температура, λ — теплопроводность, Q_H — удельное (в единице объема) тепловыделение источника тепла.

При численном расчете теплопередачи в твердом теле учитывается, что тело состоит из нескольких слоев с контактными тепловыми сопротивлениями между ними. Конвективный теплообмен между поверхностью твердых тел и текучей средой численно моделируется в пограничном слое потока среды.

Одновременно численно моделируется радиационный теплообмен. Излучающие тепло поверхности задаются абсолютно черными, белыми или идеально серыми телами, что в соответствии с законом Ламберта, позволяет излучение считать диффузным.

Таким образом, излучаемое с единицы поверхности тепло определяется в соответствии с законом Стефана—Больцмана:

$$Q_R-\varepsilon\cdot\sigma_0\cdot T_w^4, \quad (4)$$

где ε — степень черноты поверхности, σ_0 — постоянная Стефана — Больцмана, T_w — температура поверхности. Соответственно моделируется поглощение и/или отражение радиационного тепла участвующими в радиационном

теплообмене поверхностями. Аналогично излучению от твердых поверхностей моделируется излучение тепла в расчетную область от расположенных в текучей среде границ расчетной области.

Тип задачи, расчетная область. Начальные и граничные условия, сходимость. На I-ом объекте исследования (полуоткрытое пространство) изучаются условия работы сварщиков в ямах при сварке на открытой местности с учетом погодных условий (температуры воздуха, направления и силы ветра), а именно процессы распространения тепломассопереноса вредных веществ, сварочного аэрозоля и избытков теплоты в зоне дыхания сварщиков (рис.2).

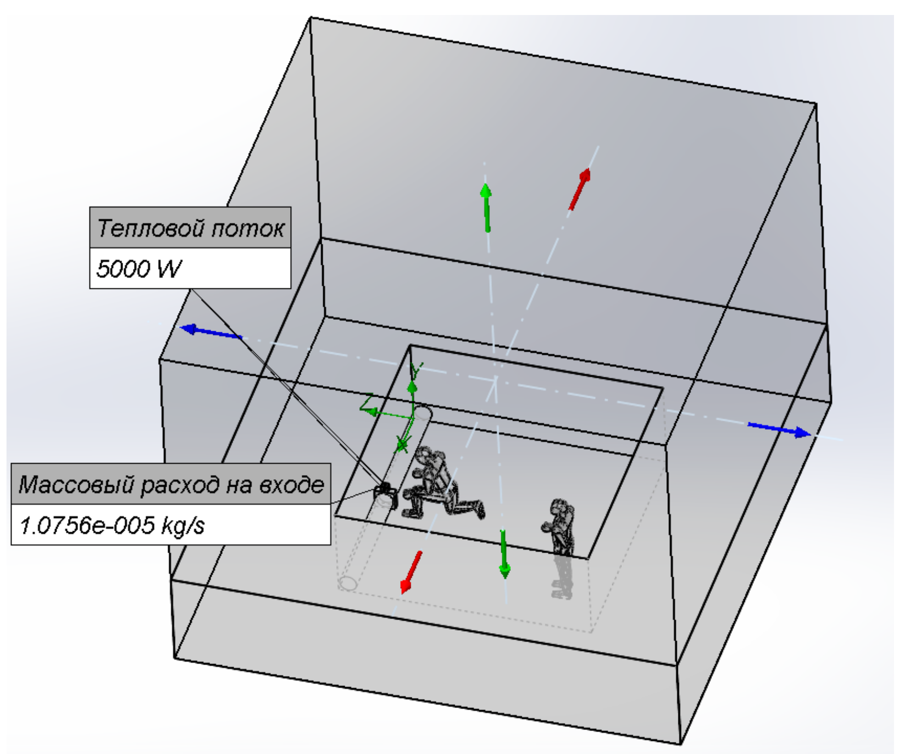


Рис. 2. Модель объекта исследования I (полуоткрытое пространство)
с показанными величинами источниковых членов

Характеристики и свойства модели.

Расчетная область — параллелепипед с основанием 8 х 8 м и высотой 6,1 м. Тип задачи — внешняя. На данный момент построена модель, учитывающая только гравитацию. Теплопроводность в твердых телах, радиационный теплообмен и нестационарность (зависимость изучаемых процессов от времени) планируются учитывать в построении обновленной модели. Текучая среда — воздух. Вредное вещество — оксиды азота. Тип течения — ламинарное и турбулентное, влажность воздуха в модели не учитывалась. Граничные условия на твердой стенке по умолчанию — адиабатическая стенка, шероховатость стенки не учитывалась.

Начальные условия.

Термодинамические параметры: давление — 101325 Па; температура окружающей среды — 0 °C.

Параметры скорости: скорость в направлении X — 0 м/с; скорость в направлении Y — 0 м/с; скорость в направлении Z — 5 м/с.

Параметры турбулентности: энергия турбулентности — 1 Дж/кг; диссипация энергии турбулентности — 1 Вт/кг.

Начальная массовая концентрация: оксиды азота — 0%, воздух — 100%.

Граничные условия: мощность теплового потока на поверхности свариваемой детали — 5 кВт; массовый расход оксидов азота — 1,0756 *10-5 кг/с.

Условие окончания решения — сходимость поставленных целей: массовый расход текучей среды; средняя скорость; массовая концентрация оксидов азота; температура текучей среды.

Начальные и граничные условия II-го и III- го объектов исследования находятся в стадии разработки.

Связь источниковых членов уравнения модели с видом сварки. Точность определения параметров состояния воздуха рабочей зоны сварщика определяется корректностью определения источниковых членов в уравнениях модели.

Качество состояния воздуха рабочей зоны сварщика при ацетилено-кислородной сварке (I-ый объект исследования) зависит от количества выделяемых оксидов азота (доминирующее загрязняющее вещество) и от тепловыделений.

Расчёт выделения оксидов азота произведён по удельным выбросам вредных веществ из источника [10].

Тепловыделение рассчитывается из уравнения экзотермической реакции ацетилена в кислороде [11].

Рассеивание тепловой энергии пламени увеличивается за счет потерь с отходящими газами [12].

Естественно, что при рассмотрении других видов сварки, например, по объектам исследования II и III, необходимо провести дополнительные, в том числе экспериментальные исследования количества и состава выделяющихся вредных веществ и избытков явной теплоты. Эти работы планируются по проекту.

Уточнённые этапы проведения работ по проекту.

Этап 1. Анализ состояния воздушной среды рабочих зон сварщиков, работающих на открытой местности в колодцах, ямах и траншеях (полуоткрытые пространства). Корреляция экспериментальных данных с результатами аттестации непостоянных рабочих мест на вредные условия труда. Аналитический обзор выполненных ранее исследований по изучению источников исследуемых опасных и вредных производственных факторов (ОВПФ) для различных видов сварки в стеснённых условиях и на труднодоступных объектах.

Обзор и анализ технологий сварки, применяемых при работе под водой. Экспериментальные исследования с целью определения исходных данных для математического и компьютерного моделирования.

Этап 2. Разработка моделей процессов выделения вредных веществ и избытков теплоты от источников загрязнения при различных видах сварки в воздух рабочей зоны полуоткрытых (ограниченных) пространств. Обоснование выбора математических моделей тепломассопереноса и их реализация в стесненных условиях. Разработка обобщенных математических моделей процессов распространения вредных веществ и избытков явной теплоты в полуоткрытых (ограниченных) пространствах сложной конфигурации. Этапы 1 и 2 реализуются в 2016 году.

Этап 3. Исследование источников выделения вредных веществ и теплового излучения при выполнении сварочных работ в закрытых пространствах и замкнутых ограниченных объемах (герметичные кабины магистральных трубопроводов, трюмы судов, цистерны и резервуары); в условиях, где невозможно применение традиционных видов вентиляции.

Экспериментальное определение уровней воздействия загазованности, запылённости, повышенной температуры и подвижности воздуха на сварщиков, работающих закрытых пространствах и замкнутых ограниченных объемах.

Этап 4. Разработка программного обеспечения для численного моделирования распространения вредных веществ и избытков теплоты в герметичных кабинах, расположенных на магистральных трубопроводах, в трюмах судов, цистернах и резервуарах с учётом завихрений газовоздушных потоков и различных видов теплообмена. Этапы 3 и 4 запланированы к реализации в 2017 году.

Этап 5. Корректировка математических моделей, уточнение граничных условий. Проверка адекватности моделей по экспериментальным данным для глубоководной сварки. Корректировка и разработка программного обеспечения и проведение модельных численных экспериментов. Уточнение и корректировка разработанных математических моделей на основе результатов экспериментальных исследований. Технология проектирования средств защиты сварщиков, работающих под водой. Методики расчёта систем защиты от пыле- газовыделений, тепловых излучений, по критериям обеспечения санитарно-гигиенических нормативов ПДК, ПДУ.

Этап 6. Разработка рекомендаций по обеспечению ПДК и ПДУ в рабочих зонах сварщиков при ремонте и строительстве нефтегазодобывающих платформ на шельфе. Требования к системам вентиляции в замкнутых ограниченных объёмах. Технология проектирования систем и средств пыле- и тепло-газозащиты сварщиков при работе под водой. Мобильные вентиляционные комплексы, фильтро-вентиляционные установки, индивидуальные средства защиты. Инженерные технические решения обеспечения ПДК и ПДУ в рабочих зонах при работе сварщиков под водой. Этапы 5 и 6 запланированы к реализации в 2018 году.

Выводы.

1. Построенная классификация труднодоступных объектов и классификация по способам применяемой сварки позволили систематизировать и уточнить требования к математическим моделям объектов исследования.
2. Представленные математические модели позволяют детально определить физические поля воздействия опасных и вредных производственных факторов на сварщиков для исследуемых объектов.
3. В дальнейшем на основе численных расчётов будут разработаны конкретные инженерные решения, позволяющие сконструировать систему или средство защиты сварщика.

Библиографический список

1. Сварка стальных газопроводов и газового оборудования в городском коммунальном хозяйстве и энергетических установках : руководящий документ РД 01-001-06 / В. В. Авилкин [и др.] ; ГУП «МОСГАЗ». — Москва : ГУП «МОСГАЗ» ; КПСФ «Спецстройсервис», 2006. — 79 с.

2. СТО Газпром 2–2.2–136–2007. Инструкция по технологиям сварки при строительстве и ремонте промысловых и магистральных газопроводов. Часть I. [Электронный ресурс] / ОАО «Газпром». — 2007. — Режим доступа : http://www.znaytovar.ru/gost/2/STO_Gazprom_2221362007_Instruk.html (дата обращения : 12.06.2016).

3. Сварка при строительстве и ремонте магистральных нефтепроводов : руководящий документ РД-25.160.00-КТН-011-10 [Электронный ресурс] / ОАО «АК "Транснефть"» ; ОАО «Гипротрубопровод». — Режим доступа: http://gisprofi.com/gd/documents/rd-25-160-00-ktn-011-10-svarka-pri-stroitelstve-i-remonte-magistralnyh-neft.html (дата обращения : 02.06.16).

4. Гришагин, В. М. Сварочный аэрозоль: образование, исследование, локализация, применение. / В. М. Гришагин // Томск : Изд-во Томского политехн. ун-та, 2011. — 213 с.

5. Кононенко, В. Я. Гиперборическая сухая подводная сварка (обзор) / В. Я. Кононенко. — Автоматическая сварка. — 2008. — № 4. — С. 44–50.

6. Allume C.J. Effect on pressure on arcs // Proc. of the Int. Conf. of the International Institute of Welding, Trondheim, June 27 28, 1983.- P. 171-178.

7. Bailey N. Welding under water a metallurgical appraisal // Proc. the First Intern, offshore and polar eng. conf., Edinburgh, 11-16, Aug., 1991. - Vol. 4. - P. 331-338.

8. Richardson I. Deflection of a hyperbaric plasma arc in a transverse in a transverse magnetic field // Proc. of the 12th Intern, conf. on offshore mechanics and arctic engi. - 1993. - Vol. 3-A. - P 155-166.

9. Конечно-элементное моделирование процессов массопереноса загрязнений в производственной среде с учетом завихрений воздушных потоков/ Б. Ч. Месхи [и др.] // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2012. — Т.12, №6(67). — С.10–16.

10. Тищенко, Н. Ф. Охрана атмосферного воздуха. Расчет содержания вредных веществ и их распределение в воздухе / Н. Ф. Тищенко. — Москва : Химия, 1991. — 368 с.

11. Андреев, С. Б. Основы сварки судовых конструкций / С. Б. Андреев, В. С. Головченко. — Санкт-Петербург : Судостроение, 2006. — 552с.

12. Рыкалин, Н. Н. Расчёты тепловых процессов при сварке / Н. Н. Рыкалин. — Москва : Машиностроение, 1951. — 296 с.

References

1. Avilkin, V.V., et al. Svarka stal'nykh gazoprovodov i gazovogo oborudovaniya v gorodskom kommunal'nom khozyaystve i energeticheskikh ustanovkakh : rukovodyashchiy dokument RD 01-001-06. [Welding of steel gas pipelines and gas equipment in municipal engineering and power plants: RD 01-001-06 regulatory document GUP "MOSGAZ".] Moscow: GUP "MOSGAZ"; KPSF "Spetsstroyservis", 2006, 79 p. (in Russian).

2. STO Gazprom 2–2.2–136–2007. Instruktsiya po tekhnologiyam svarki pri stroitel'stve i remonte promyslovykh i magistral'nykh gazoprovodov. Chast' I. [Gazprom Company's code 2-2.2-136-2007. Manual on welding techniques under field and main gas pipelines construction and repair. Part I.] "Gazprom" PJSC, 2007. Available at: http://www.znaytovar.ru/gost/2/STO_Gazprom_2221362007_Instruk.html (accessed: 12.06.2016) (in Russian).

3. Svarka pri stroitel'stve i remonte magistral'nykh nefteprovodov : rukovodyashchiy dokument RD-25.160.00-KTN-011-10. [Welding under main oil pipelines construction and repair: regulatory document RD-25.160.00-KTN-011-10.] "AK "Transneft" PJCS; "Giprotruboprovod"PJCS. Available at: http://gisprofi.com/gd/documents/rd-25-160-00-ktn-011-10-svarka-pri-stroitelstve-i-remonte-magistralnyh-neft.html (accessed: 02.06.16) (in Russian).

4. Grishagin, V.M. Svarochnyy aerozol': obrazovanie, issledovanie, lokalizatsiya, primenenie. [Welding fume: formation, investigation, localization, and application.] Tomsk: Izdatel'stvo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta, 2011, 213 p. (in Russian).

5. Kononenko, V.Y. Giperboricheskaya sukhaya podvodnaya svarka (obzor.) [Hyperbaric dry underwater welding (Review)] Avtomaticheskaya Svarka, 2008, no. 4, pp. 44–50 (in Russian).

6. Allume, C.J. Effect on pressure on arcs. Proc. of the Int. Conf. of the International Institute of Welding, Trondheim, June 27-28, 1983, pp. 171–178.

7. Bailey, N. Welding under water a metallurgical appraisal. Proc. the First Int. Offshore and Polar Eng. Conf., Edinburgh, Aug.11-16, 1991, vol. 4, pp. 331–338.

8. Richardson, I. Deflection of a hyperbaric plasma arc in a transverse in a transverse magnetic field. Proc. of the 12th Int. Conf. on offshore mechanics and arctic eng., 1993, vol. 3-A, pp. 155–166.

9. Meskhi, B. C., et al. Konechno-elementnoe modelirovanie protsessov massoperenosa zagryazneniy v proizvodstvennoy srede s uchetom zavikhreniy vozdushnykh potokov. [Finite-element modeling of contamination mass transfer processes in technological environment with regard to airflow turbulence.] Vestnik of DSTU, 2012, vol.12, no. 6(67), pp. 10–16 (in Russian).

10. Tishchenko, N.F. Okhrana atmosfernogo vozdukha. Raschet soderzhaniya vrednykh veshchestv i ikh raspredelenie v vozdukhe. [Air protection. Calculation of the content of harmful substances and their distribution in the air] Moscow: Khimiya, 1991, 368 p. (in Russian).

11. Andreev, S.B., Golovchenko, V.S. Osnovy svarki sudovykh konstruktsiy. [Basics of welding of ship structures.] St.Petersburg: Sudostroenie, 2006, 552 p. (in Russian).

12. Rykalin, N.N. Raschety teplovykh protsessov pri svarke. [Calculations of thermal processes in welding.] Moscow: Mashinostroenie, 1951, 296 p. (in Russian).

Поступила в редакцию 30.06.2016
Сдана в редакцию 01.07.2016
Запланирована в номер 07.07.2016